تأثیر سرعت چرخشی ابزار بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال جوشکاری همزن اصطکاکی ورق نازک آلومینیم 7075-T6*

علی مهری(۱)	امیر عبداله زاده(۲)	سینا انتصاری(۳)	حمید اسدی(٤)	جین تائو وانگ(۵)

چکیده

در این پژوهش، اتصال‌دهی ورق نازک آلومینیم 7075-T6 بوسیله جوشکاری همزن اصطکاکی با موفقیت انجام شد. سرعت حرکت خطی جوشکاری مقدار ثابت ۵۰ میلیمتر بر دقیقه و سرعت چرخشی ابزار ٦۰۰، ۱۰۰۰ و ۱٦۰۰ دور بر دقیقه انتخاب شدند. با کمک میکروسکوپ الکترونی عبوری و سنجش پراش الکترون برگشتی، مکانیزم تغییرات ریزساختاری فلز جوش تعیین گردید. نتایج نشان داد حین فرآیند جوشکاری همزن اصطکاکی، پدیده‌هایی مثل رسوب‌گذاری، تبلور مجدد دینامیکی پیوسته، رشد دانه و همچنین انحلال رسوبات در ناحیه همزده جوش اتفاق می افتند که بر خواص مکانیکی اتصال تاثیر بسزایی دارد. همچنین در جوشکاری همزن اصطکاکی ورق نازک آلومینیم، عامل تعیین کننده ریز ساختار نهایی اتصال، کرنش مکانیکی پلاستیک فرآیند بوده و اثر آن بیش از حرارت ورودی جوشکاری می‌باشد.

واژه‌های کلیدی جوشکاری همزن اصطکاکی، آلیاژ آلومینیم، تبلور مجدد، خواص مکانیکی، رسوب گذاری.

The Effects of Tool Rotational Speed on the Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded 7075-T6 Aluminum Thin Sheet

A. Mehri	A. Abdollah-zadeh	S. Entesari	H. Assadi	J. T. Wang

Abstract

In the present research, FSW of thin sheets of the 7075-T6 aluminum alloy were investigated. Welding speed was held at 50 mm/min. The tool rotational speeds were 600, 1000 and 1600 rpm. The microstructure was investigated by both transmission electron microscope (TEM) and electron backscattered diffraction scans (EBSD). The results indicated that several phenomena occur instantly during FSW in the stir zone, such as precipitation, continuous dynamic recrystallization (CDRX), grain growth and precipitates dissolution which have a severe effect on the mechanical properties. It could also be concluded that for thin sheet of 7075-T6 aluminum alloy, plastic strain is the dominating factor over heat input of the FSW in determination of the microstructure of the weld zone.

Keywords Friction stir welding, Aluminum alloys, Recrystallization, Mechanical properties, Precipitation.

* نسخهٔ نخست مقاله در تاریخ ۹۵/۱/۲٦ و نسخهٔ پایانی آن در تاریخ ۹۵/۱۰/۲۵ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) دانشجوی دکتری، مهندسی مواد ، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

(۲) نویسنده مسئول: استاد، مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.		Email: zadeh@modares.ac.ir

(۳) کارشناس ارشد، مهندسی مواد ،دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

(٤) استاد، مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

(۵) استاد، مهندسی مواد، دانشگاه علم و صنعت نانجینگ، نانجینگ، چین

DOI: 10.22067/ma.v30i1.55116

مقدمه

امروزه آلیاژهای آلومینیم با استحکام بالا از جمله سری ۷xxx به طور وسیعی در صنایع هوایی استفاده می‌شوند [1,2]. اما به دلیل جوش پذیری ضعیف آن‌ها به انواع روش‌های ذوبی، استفاده این آلیاژها در اتصالات جوشی با مشکل رو به روست [3]. به همین جهت توجه زیادی بر روی روش جوشکاری همزن اصطکاکی (Friction stir welding) این آلیاژها متمرکز شده است [4,5] این روش یک فرآیند اتصال‌دهی حالت جامد بوده که قادر به تولید جوش‌هایی با کیفیت بالا است. همچنین از بسیاری از مزایای متالورژیکی، سازگاری با محیط زیست و مصرف انرژی پایین نیز برخوردار است.

در طی جوشـــکاری همزن اصـــطکاکی، یک ابزار چرخان از طریق اصطکاک شانه و پین با فلز تولید گرما کرده و با تسهیل سیلان فلز در زیر شانه ابزار، سبب شـــکل گرفتن اتصـــال جوش می‌شـــود [6]. در طول جوشــکاری همزن اصــطکاکی ماده پیرامون ابزار تحت تغییر شکل پلاستیک شدید در دمای بالا قرار می‌گیرد. این موضوع تاثیر به سزایی بر روی ریزساختار، به ویژه در مرکز ناحیه جوش، داشته و به ساختار ریزدانه ناشی از تبلور مجدد، منجر می شود. منطقه مرکزی جوش، که محل فرو رفتن پین ابزار است، به ناحیه هم‌خورده (Stir zone (SZ)) معروف بوده و نقش بســیار مهمی را در خواص مکانیکی اتصال بازی می‌کند. شایان ذکر است که جوشـــکاری همزن اصـــطکاکی می‌تواند بر روی ویژگی‌های ســاختار مانند رسـوب گذاری و تشــکیل فازهای ثانویه نیز تاثیر بگذارد [7].

برای ایجاد یک جوش عاری از عیب با خواص مکانیکی مناسب بایستی شرایط بهینه جوشکاری همزن اصطکاکی به دست آورده شود. مقالات بسیاری بر روی بهینه سازی ابزار و متغیرهای جوشکاری همزن اصطکاکی آلیاژ 7075-T6 با ضخامت‌های مختلف از ۲.۳ تا ۹ میلیمتر منتشر شده است [8-13]. از آن جمله فولر (Fuller) و همکارانش [12] تاثیر ضخامت نمونه‌های جوشکاری را بر ریز ساختار و خواص مکانیکی جوشکاری همزن اصطکاکی آلیاژ آلومینیم 7075-T6 بررسی و رفتار آلیاژ را در طول زمان پیرسازی طبیعی مشاهده کردند. آلیاژهای آلومینیم سری ۷xxx دارای رسوبات استحکام بخش حساس به نرخ سرمایش از دمای بالا هستند [14]. آن‌ها همچنین نشان دادند که ورق نازک تر، دارای خواص مکانیکی کششی بالاتری، به دلیل سرعت سرد شدن بیشتر، می باشد. در ضخامت‌های بیشتر، نرخ انتقال حرارت از منطقه جوش به محیط پیرامون پایین تر است. بنابراین تاثیر گرمای ورودی جوشکاری از اهمیت بالاتری برخوردار است. برعکس، در ضخامت‌های کمتر تاثیر گرمای ورودی بر روی تغییرات ریزساختار به دلیل نرخ بالای سرد شدن، کمتر است. بدیهی است که تغییرات ریزساختاری ماده در نهایت تعیین کننده خواص فیزیکی و مکانیکی آن است. از آنجا که تحقیقاتی در ارتباط با تغییرات ریز ساختار ورق نازک 7075-T6 با ضخامت کمتر از ۲/۳ میلیمتر در طول جوشکاری همزن اصطکاکی وجود ندارد، هدف این پژوهش بررسی تغییرات ریزساختار و به تبع آن خواص مکانیکی اتصال ایجاد شده ورق نازک آلومینیم 7075-T6 با ضخامت ۱ میلیمتر به روش جوشکاری همزن اصطکاکی است.

مواد و روش پژوهش

در این پژوهش از ورق نازک آلیاژ آلومینیم 7075-T6 با ضخامت 1 میلیمتر و ترکیب شیمیایی مطابق جدول (۱) استفاده شد. جوشکاری همزن اصطکاکی در سه وضعیت مختلف با سرعت‌های چرخشی ابزار ٦٠٠، ١٠٠٠ و ١٦٠٠ دور بر دقیقه و سرعت انتقالی ثابت٥٠ میلیمتر بر دقیقه در راستای موازی با جهت نورد ورق صورت گرفت. ابزار جوشکاری همزن اصطکاکی مورد استفاده در این آزمایش از فولاد H۱۳ عملیات حرارتی شده با قطر شانه ١٢ میلیمتر، قطر پین ٤ میلیمتر و ارتفاع پین ١ میلیمتر انتخاب شد. در طول جوشکاری اندازه گیری

دمایی توسط ترموکوپل‌های نوع K که در فاصله ۷ میلیمتر از مرکز جوش نصب شده بودند، صورت گرفت.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی ورق آلومینیم 7075-T6 مورد استفاده در این پژوهش (بر حسب درصد وزنی)

Al	Si	Fe	Ti	Mg	Cu	Zn
پایه	۰/۰۲۰	۰/۰۳٤	۰/۰۲۸	۲/۳۷	۱/۹۱	۵/۸٦

تغییرات ریزساختاری ناحیه همزده جوش از طریق سطح مقطع عرضی جوش و با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (Scanning electron microscopy (SEM)) هیتاچی(Hitachi) مدل SU 1510 که به سیستم پراش الکترون برگشتی (Electron back-scattered diffraction (EBSD)) مجهز بود بررسی شد. طول گام جاروب سطح ۰.۱۵ میکرون تنظیم شد. مرزدانه‌های با انحراف (Misorientation) بیش از ۱۵ درجه به عنوان مرز اصلی (High angle boundaries (HAB)) و کمتر از آن به عنوان مرز فرعی (Low angle boundaries (LAB)) ثبت گردیدند. درصد نسبی مرزهای فرعی و اصلی نسبت به هم به این ترتیب تعیین شد که پس از تفکیک دانه های اصلی، سطح معادل هر دانه تعیین شده و در نهایت اندازه قطر دایره معادل هردانه به عنوان قطر یا اندازه همان دانه گزارش گردید.

وضعیت رسوب گذاری نمونه ها به وسیله دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری (Transmission electron microscopy (TEM)) تکنای (Tecnai) مدل G200 با توان ۲۰۰ کیلوولت مورد بررسی قرار گرفت. شایان ذکر است کلیه مشاهدات ریزساختاری بعد ازگذشت بیش از ۱۵۰۰۰ ساعت انجام شد تا از وقوع پیرسازی طبیعی و ثابت شدن خواص ماده اطمینان حاصل شود.

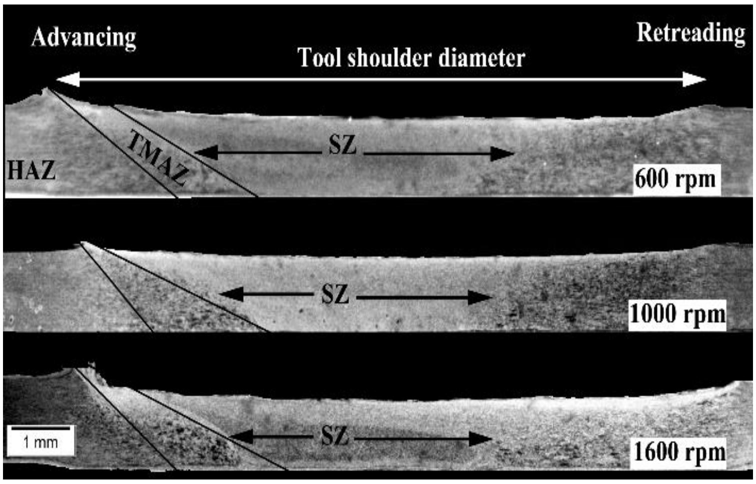
نمونه‌های آزمون کشش اتصالات حاصل، بر طبق استاندارد ASTM E8M، در مقیاس کوچک و به صورت عمود به خط جوش آماده سازی شدند. آزمون کشش تک محوری با نرخ ثابت ۱ میلیمتر بر دقیقه انجام شد.

نتایج و بحث

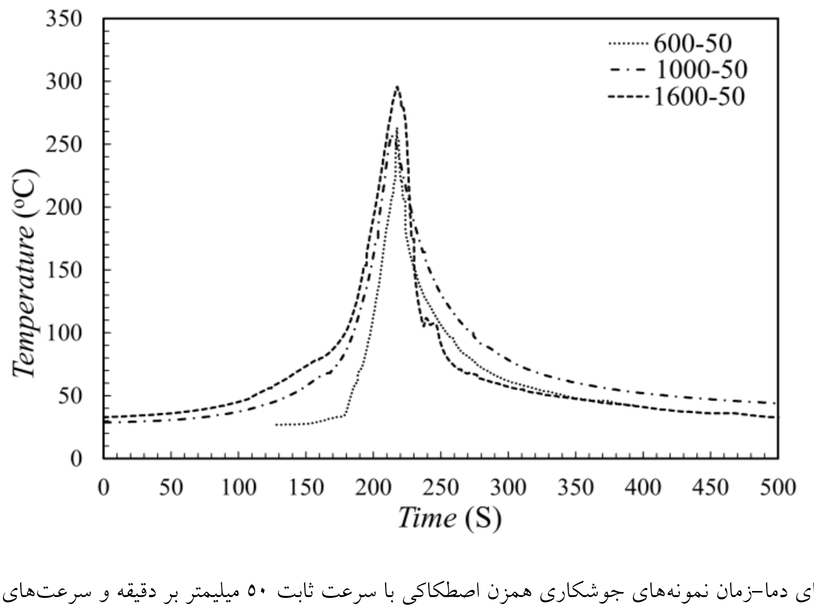
شکل (۱)، تصویر ماکروگرافی اتصالات جوشکاری همزن اصطکاکی را نشان می‌دهد. هیچ نوع ترک و تخلخل در ناحیه جوش مشاهده نمی‌شود. ناحیه هم-خورده، ناحیه تحت تاثیر گرما و کار مکانیکی (Thermomechanically affected zone (TMAZ)) و ناحیه تحت تاثیر حرارت (Heat affected zone (HAZ)) به وضوح قابل مشاهده می‌باشند. اندازه ناحیه هم‌خورده برای تمامی نمونه‌ها در سطح مقطع جوش اندازه گیری شد. پهنای ناحیه جوش برای سه نمونه با سرعت چرخشی ۶۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۶۰۰ دور بر دقیقه به ترتیب ۵.٤۰، ۵.٤٤ و ۵.۸۰ میلیمتر اندازه گیری شد. دیده می-شود که پهنای ناحیه همزده تقریبا بدون تغییر باقیمانده است. نکته جالب توجه این است که عرض ناحیه هم-خورده به اندازه حدود نیمی از عرض شانه ابزار بوده و فقط حدود ۱,۵ میلیمتر از قطر پین ابزار (٤ میلیمتر) بزرگ تر است. این مطلب در مورد هر سه نمونه صادق می باشد. می‌توان نتیجه گرفت به دلیل سرعت بالای انتقال حرارت از یک ورق نازک به محیط خارج، گرمای ورودی صرفا در ناحیه زیر شانه ابزار متمرکز شده و به نقاط دور از منطقه جوش راه پیدا نکرده است. باید توجه داشت که نرخ انتقال حرارت به طور معکوس با ضخامت ورق متناسب است [15]. با دقت در پروفیل گرمایی نمونه‌های مختلف در شکل (۲) می‌توان تشخیص داد که سرعت چرخشی ابزار تاثیر چندانی بر دمای ناحیه هم-خورده نداشته است. از آنجا که تفاوت قابل توجهی بین دمای بیشینه نمونه‌های مختلف دیده نمی‌شود، می‌توان نتیجه گیری کرد که گرمای ورودی عامل موثر بر ریزساختار ناحیه هم‌خورده نیست. بدیهی است که کرنش ایجاد شده در هنگام جوشکاری همزن اصطکاکی، با افزایش سرعت چرخشی افزایش می‌یابد. بنابراین کرنش مکانیکی وارده نقش اساسی در تغییرات ریزساختاری در حین جوشکاری همزن اصطکاکی ورق‌های نازک دارد. این مطالب با گزارش‌های قبلی مبنی بر اینکه گرمای

ورودی فرآیند به عنوان پارامتر کلیدی تاثیر گذار بر ماکروساختار و ریزساختار تصور می‌شد، در تضاد است [12,14,16].

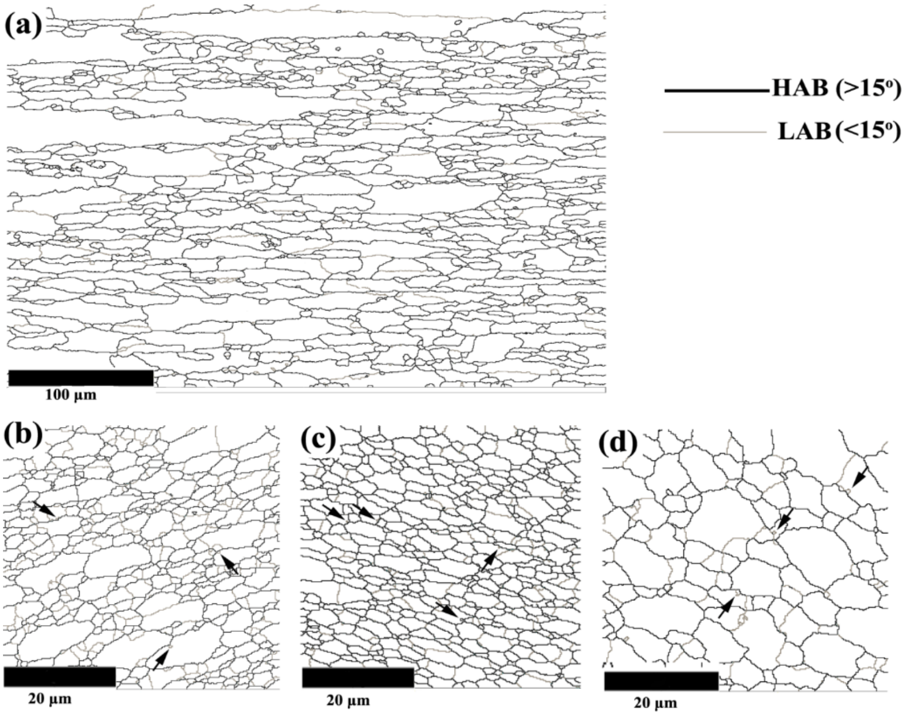
شکل (۳)، نقشه مرزدانه ناحیه همزده را در مقایسه با فلز پایه نشان می‌دهد که توسط دستگاه سنجش پراش الکترون های برگشتی تهیه شده اند. بدین وسیله، مرز دانه‌های با زاویه کم و متوسط اندازه دانه‌ها استخراج شده و در جدول (۲) نشان داده شده است. در قسمت فلز پایه دانه‌های کشیده شده موازی با جهت نورد با متوسط اندازه دانه ۸.۱ میکرومتر دیده می‌شود. در حالی که دانه‌های ناحیه جوش با سرعت‌های چرخشی ٦۰۰، ۱۰۰۰ و ۱٦۰۰ دور بر دقیقه به دانه‌های هم محور ریز به ترتیب با اندازه متوسط ۳.۸، ۲.۵ و ۵.۱ میکرومتر تبدیل شده است.



شکل ۱ سطح مقطع جوش با سرعت ثابت ۵۰ میلیمتر بر دقیقه و سرعت‌های مختلف چرخش ابزار ٦۰۰، ۱۰۰۰ و ۱٦۰۰ دور بر دقیقه



شکل ۲ نمودارهای دما–زمان نمونه‌های جوشکاری همزن اصطکاکی با سرعت ثابت ۵۰ میلیمتر بر دقیقه و سرعت‌های چرخشی مختلف ٦۰۰، ۱۰۰۰ و ۱٦۰۰ دور بر دقیقه



شکل ۳ تصاویر تهیه شده بوسیله سنجش پراش الکترون‌های برگشتی از مرزهای اصلی و فرعی دانه‌های مربوط به: a) فلز پایه، و ناحیه هم‌خورده نمونه‌های جوش همزن اصطکاکی در b) ٦٠٠، c) ۱۰۰۰ و d) ١٦٠٠ دور بر دقیقه که در مدت زمان بیش ۱۵۰۰۰ ساعت پیرسازی طبیعی شده‌اند

جدول ۲ درصد نسبی مرزهای فرعی و اندازه متوسط دانه‌های اصلی در فلز پایه T6–۷۰۷۵ و نمونه‌های جوش همزن اصطکاکی. درصد مرزهای فرعی و اندازه دانه های اصلی بوسیله دستگاه سنجش پراش الکترون‌های برگشتی محاسبه شده‌اند

سرعت چرخش ابزار (دور بر دقیقه)	درصد نسبی مرزهای فرعی (درصد)	اندازه متوسط دانه‌های اصلی ۰/۰۵ ± (میکرومتر)
فلز پایه 7075-T6	۱۹	۱/۸
٦۰۰	٢٦	۳/۸
۱۰۰۰	۱۳	۲/۵
١٦۰۰	۳۱	۵/۱

نتایج تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که مکانیزم‌های مختلف تغییر ریزساختار در اصلاح دانه‌های این آلیاژ در طول فرآیند جوشکاری همزن اصطکاکی نقش دارند [14,17]. اخیراً در مورد سایر فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک آلیاژ آلومینیم نیز گزارشات مشابهی منتشر شده است [18,19]. تغییر شکل دانه‌های درشت و کشیده اولیه به دانه‌های ریز هم محور با توزیع همگن و یکنواخت به تبلور مجدد دینامیکی اشاره دارد. تعداد کمی خمیدگی (Bulging) روی مرز دانه‌ها در ناحیه هم‌خورده دیده می شوند که نشان دهنده وجود مکانیزم تبلور مجدد دینامیکی ناپیوسته (Discontinues dynamic recrystallization (DDRX)) به عنوان یک مکانیزم محدود در تغییر ریزساختار است (پیکان‌های سیاه رنگ روی شکل). تعداد زیاد مرز دانه‌های کم زاویه حاکی از این است که تبلور مجدد دینامیکی پیوسته (Continues dynamic recrystallization (CDRX)) مکانیزم اصلی تغییر شکل

است. در طول تبلور مجدد دینامیکی پیوسته یک تغییر تدریجی از بازیابی پیوسته مرزهای فرعی با زاویه کم به مرزدانه‌های اصلی با زاویه باز، توسط چرخش و به هم پیوستن زیر دانه‌های ناپایدار اولیه ایجاد می‌شود [13,18]. به طور خلاصه سرعت چرخشی پایین (٦۰۰ دور بر دقیقه) قادر به ایجاد تغییر شکل کافی در ریزساختار نبوده بنابراین تبلور مجدد دینامیکی پیوسته بطور ناقص اتفاق افتاده و درصد حجمی مرزهای فرعی با زاویه کم در مقدار زیاد ٢٦٪ در مقایسه با فلز پایه (١٩٪) باقی می‌ماند. با افزایش سرعت چرخشی به ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، تبلور مجدد شدت می‌گیرد. بنابر این اندازه دانه و درصد مرزهای فرعی با زاویه کم به ترتیب به ۲.۵ میکرومتر و ۱۳٪ کاهش می‌یابند. از طرف دیگر، کرنش ایجاد شده با اعمال چرخش بیشتر در ١٦۰۰ دور بر دقیقه، اندازه دانه‌ها را به طور قابل توجهی تا ۵.۱ میکرومتر و درصد حجمی مرزهای فرعی با زاویه کم را به ۳۱٪ افزایش می‌دهد.

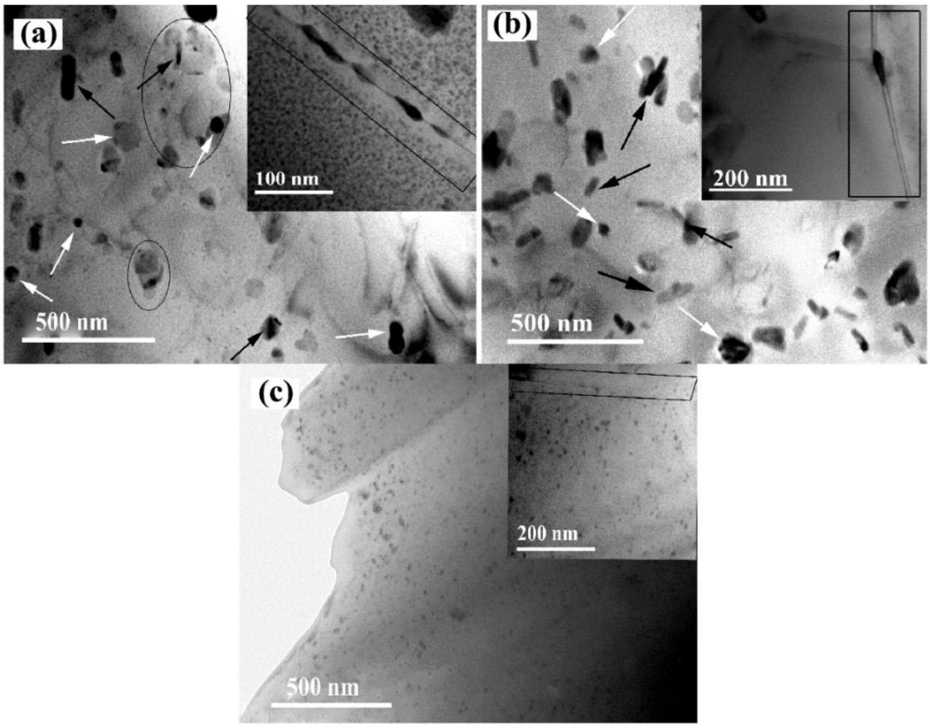
همان طور که قبلا اشاره شد، دمای بیشینه با تغییر سرعت چرخشی ابزار تقریبا ثابت باقی می‌ماند. بنابراین تغییرات اندازه دانه در ورق نازک آلومینیم نیز تحت تاثیر گرمای ورودی نیست. بر این اساس، رشد ناگهانی اندازه دانه در سرعت چرخشی ١٦۰۰ دور بر دقیقه چندان در نگاه اول قابل درک نیست. اما می‌توان آن را به انحلال رسوبات استحکام دهنده زمینه مربوط ساخت که مانند مانعی در مقابل حرکت مرزدانه‌ها عمل می‌کنند. همان طور که در جدول (۲) دیده می‌شود، اندازه دانه با افزایش سرعت چرخشی از ٦۰۰ به ۱۰۰۰ دور بر دقیقه کاهش می‌یابد. سپس به طور ناگهانی وقتی سرعت چرخشی به ١٦۰۰ دور بر دقیقه می‌رسد، اندازه آنها مجددا افزایش پیدا می‌کند. پس ریزترین دانه‌ها در سرعت چرخشی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه حاصل می‌شوند. این می‌تواند به سطح بالای تبلور مجدد دینامیکی پیوسته مربوط شود که قادر است انتقال از حالت مرزهای فرعی با زاویه کم به مرزهای اصلی با زاویه باز را از طریق بالا بردن مقدار تغییر شکل پلاستیک، شدت بخشد.

برای مشاهده مورفولوژی اندازه و توزیع رسوبات در فلز پایه و نمونه‌های جوشکاری همزن اصطکاکی از میکروسکوپ الکترونی عبوری استفاده شد. شکل (٤–a)، تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از فلز پایه را نشان می‌دهد. در این شکل می توان به هم چسبیدگی رسوبات درشت که با یک دایره مشخص شده اند را بخوبی دید. هم رسوبات صفحه ای شکل که به فاز η مشهورند [20] (مشخص شده با پیکان سیاه) و هم رسوبات کروی که با عنوان فاز η′ شناخته می‌شوند [20] (مشخص شده با پیکان سفید) با متوسط اندازه ۳۰ تا ۹۰ نانومتر به طور واضح قابل رؤیت هستند.
با بالابردن بزرگنمایی، توزیع رسوبات بین دانه ای و میان دانه ای در فلز پایه نیز آشکار می‌شود. (شکل ٤–a). شکل (٤–b) نشان می‌دهد که رسوبات در ناحیه همزده جوش در طول جوشکاری همزن اصطکاکی شکسته شده، به صورت همگن تری توزیع و بیشتر حل شده است (۱۰۰۰ دور بر دقیقه). این پدیده با افزایش کرنش اعمالی در اثر افزایش سرعت چرخشی تا ١٦۰۰ دور بر دقیقه شدت می‌گیرد. همان طور که در شکل (٤–c) دیده می‌شود تقریبا هیچ رسوبی در نمونه با سرعت چرخشی ١٦۰۰ دور بر دقیقه باقی نمانده و صرفا تعداد کمی از رسوبات کروی با اندازه کوچک تر از ۲۰ نانومتر را می‌توان یافت (رسوبات η) [20,21].

همان طور که قبلا هم اشاره شد برای ورق نازک آلومینیم، عمدتا این کرنش مکانیکی است که بر روی تغییر ریز ساختار در طول فرآیند جوشکاری همزن اصطکاکی تاثیر می‌گذارد. در نتیجه افزایش کرنش پلاستیک باعث انحلال رسوبات می‌باشد. تعجب آور اینکه بعد از گذشت زمان طولانی (بیش از ۱۵۰۰۰ ساعت) مجدداً رسوبات حل شده، رسوب نکرده و پیرسازی طبیعی هنوز رخ نداده است. همچنین دیده می-شود که رسوبات مرزدانه ای نیز در سرعت ١٦۰۰ دور بر دقیقه تقریباً به طور کامل حل شده‌اند (شکل ٤-c)، در حالی که در سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه رسوباتی بر روی مرزدانه‌ها وجود دارد که سبب قفل شده آن‌ها می‌شود. این ذرات به رسوبات $MgZn_2$ معروف هستند [22]. تصاویر داخل شکل‌ها، با بزرگنمایی بالاتر از محل مرز

دانه‌ها تهیه شده اند. نمونه مربوط به فلز پایه، شکل (a-٤)، تعداد زیادی رسوب بر روی مرز دانه‌های فلز پایه را نشان می‌دهد. در حالی که در (شکل b-٤) انحلال بیشتر رسوبات در ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و در (شکل c-٤) انحلال تمامی رسوبات مرز دانه ای در ۱٦۰۰ دور بر دقیقه چشم گیر است. این می تواند دلیل اصلی رشد شدید دانه‌ها در ۱٦۰۰ دور بر دقیقه باشد.

در شکل (۵)، نمودار تنش-کرنش مربوط به نمونه-های جوش آورده شده است. همانطور که دیده می‌شود، در سرعت انتقالی ۵۰ میلیمتر بر دقیقه و سرعت چرخشی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، بالاترین خواص مکانیکی برای نمونه‌های جوش بدست آمده است. کرنش شکست نمونه مذکور حدود ۷٪ است. این مقدار کرنش شکست نشان دهنده انعطاف پذیری بالای این نمونه و همچنین تهی بودن اتصال از عیوب ماکروسکوپی است. ساختار ریز دانه در کنار حضور رسوبات استحکام دهنده زمینه فلزی، از مهم‌ترین دلایل نیل به این نتایج موفقیت آمیز است. با افزایش سرعت چرخشی به ۱٦۰۰ دور بر دقیقه، مقدار کرنش و استحکام شکست به شدت افت کرده است.



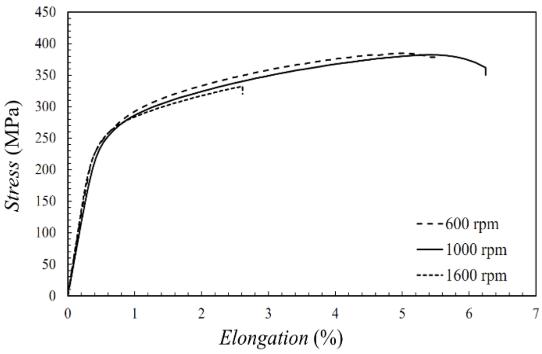
شکل ٤ تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری در میدان دید روشن از: a) ریزساختار فلز پایه 7075-T6 شامل دو نوع رسوب بزرگ با توزیع غیر یکنواخت. ناحیه آگلومره شدن رسوبات در زمینه بوسیله شکل بیضی احاطه شده است؛ تصاویر مربوط به ناحیه هم‌خورده پس از پیرسازی طبیعی: b) ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، توزیع یکنواخت رسوبات در زمینه بوسیله کرنش اعمالی و در c) ۱٦۰۰ دور بر دقیقه، انحلال کامل رسوبات بزرگ در زمینه و بازتشکیل رسوبات ریز و کروی η′. پیکان های سیاه رنگ، رسوبات تیغه ای-شکل η و پیکان های سفید رنگ رسوبات کروی شکل η′. (تصاویر داخل شکل‌ها با بزرگنمایی بالاتر از محل مرز دانه ها تهیه شده است. شکل a، مربوط به فلز پایه، تصویر مرز دانه ای حاوی حجم زیادی از رسوبات مرزدانه ای را نشان می دهد. در شکل b، مربوط به نمونه ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، کرنش ناشی از FSW باعث انحلال حجم عمده ای از رسوبات مرز دانه ای شده است. در تصویر c، از مرز دانه، مرز دانه نمونه ۱٦۰۰ دور بر دقیقه، کاملا فقیر از رسوبات مرز دانه ای شده است. رسوبات مرز دانه ای بوسیله کرنش پلاستیک دچار انحلال شده است)

خواص کششی نمونه‌های جوشکاری همزن اصطکاکی و فلز پایه در شکل (٦) آمده است. برای یافتن بهترین نمونه از نظر عملکرد مکانیکی نمونه‌های جوش (استحکام و انعطاف پذیری) اندیس شکل‌پذیری نمونه‌ها از طریق رابطه (۱) [22] محاسبه شد.

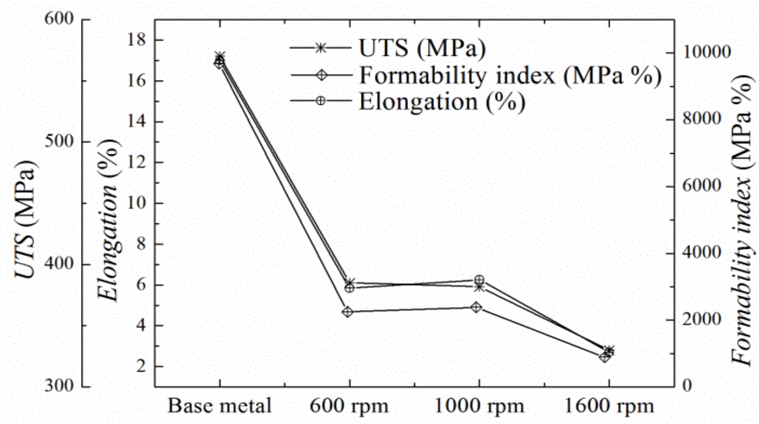
= استحکام کششی نهایی (MPa) × ازدیاد طول (٪)
اندیس شکل پذیری (MPa٪)

(۱)

همان طور که در شکل (٦) نشان داده شده است، شکل‌پذیری آلیاژ7075-T6، پس از جوشکاری همزن اصطکاکی، به دلیل تغییرات ریزساختاری که در بالا توضیح داده شد، به شدت کاهش پیدا می‌کند. حضور رسوبات مختلف نقش ویژه ای در میزان شکل‌پذیری این آلیاژ ایفا می‌کنند. در این تحقیق، کمینه اندازه دانه و زیردانه‌ها را در سرعت انتقالی ۵۰ میلیمتر بر دقیقه و سرعت چرخشی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه به دست آمد. این نشان می‌دهد که تبلور مجدد دینامیکی پیوسته تقریباً به طور کامل در این نمونه انجام شده است. کاهش شکل‌پذیری در ۱٦۰۰ دور بر دقیقه به دلیل کاهش استحکام و نرمی ناشی از رشد متوسط اندازه دانه ایجاد شده است. در سرعت 600 دور بر دقیقه ساختار، تبلور مجدد ناقص را تجربه کرده و همچنین آثاری از ساختار اولیه فلز پایه در آن باقی مانده است. در حالی که در سرعت ۱٦۰۰ دور بر دقیقه، حل شدن رسوبات سبب امکان‌پذیرشدن رشد دانه شده است. باید توجه داشت، با افزایش کرنش اعمالی، نرخ حل‌شدن رسوبات افزایش می‌یابد.



شکل ۵ نمودارهای تنش-ازدیاد طول نمونه‌های جوشکاری همزن اصطکاکی با جهت کشش عمود بر راستای جوشکاری برای نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت ثابت ۵۰ میلیمتر بر دقیقه و سرعت‌های چرخشی ٦۰۰، ۱۰۰۰ و ۱٦۰۰ دور بر دقیقه



شکل ٦ خواص مکانیکی فلز پایه در مقایسه با نمونه‌های جوشکاری همزن اصطکاکی با شرایط مختلف جوشکاری

نتیجه گیری

در حین جوشکاری همزن اصطکاکی ورق نازک آلیاژ آلومینیم 7075-T6، تغییرات ریزساختاری عمدتا با فرآیند تبلور مجدد دینامیکی پیوسته رخ می‌دهد. با افزایش نرخ کرنش پلاستیک، در اثر افزایش سرعت چرخشی ابزار جوشکاری، امکان ایجاد تبلور مجدد دینامیکی بطور کامل در ریزساختار بوجود می آید. در نتیجه آن، کاهش ابعاد دانه بندی ریزساختار در ناحیه همزده و همچنین کاهش درصد مرزهای فرعی، اتفاق می افتد که باعث افزایش اندیس شکل‌پذیری اتصال می‌گردد. از سوی دیگر، با افزایش بیشتر نرخ کرنش شکل‌پذیری اتصالات به دلیل حل شدن رسوبات در کاهش پیدا می‌کند. در نتیجه یک مقدار بهینه برای میزان کرنش پلاستیک (سرعت چرخش ابزار) قابل تصور است. به نظر می‌رسد، گرمای ورودی تاثیر قابل توجهی بر روی ریزساختار ندارد. در استفاده از ورق‌های نازک، نرخ انتقال حرارت جوشکاری همزن اصطکاکی از نمونه به محیط اطراف بسیار بالاست. از این رو کرنش مکانیکی عامل موثر اصلی در تغییرات ریز ساختاری و همچنین کنترل کننده خواص مکانیکی اتصال ورق‌های نازک آلیاژ آلومینیم 7075-T6 می‌باشد.

مراجع

1. Dubourg L., Merati A., Jahazi M., "Process optimisation and mechanical properties of friction stir lap welds of 7075-T6 stringers on 2024-T3 skin", *Materials & Design*, Vol. 31, No. 7, pp. 3324-3330, (2010).
2. Azizi A., Aalami Aleagha M.E., Moradi H., "Investigation of Thermal, Mechanical and Microstructural Properties of 7000 Series Aluminum alloys Welding Using Friction Stir Welding process", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, pp. 148-154, (in Persian), (2014).
3. Mathers G., "The welding of aluminium and its alloys", Abington, Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited TWI Ltd, (2002).
4. Mishra R.S., Ma Z.Y., "Friction stir welding and processing", *Materials Science and Engineering: R: Reports*, Vol. 50, No. 1–2, pp. 1-78, (2005).
5. Mishra R.S., Rajiv S., Murray W., "Friction stir welding and processing", ASM International, (2007).
6. Arora A., Zhang Z., De A., DebRoy T., "Strains and strain rates during friction stir welding", *Scripta Materialia*, Vol. 61, No. 9, pp. 863-866, (2009).
7. Mousavizade S.M., Ghaini F.M., Torkamany M.J., Sabbaghzadeh J., Abdollah-zadeh A., "Effect of severe plastic deformation on grain boundary liquation of a nickel–base superalloy", *Scripta Materialia*, Vol. 60, No. 4, pp. 244-247, (2009).
8. Mahoney M.W., Rhodes C.G., Flintoff J.G., Bingel W.H., Spurling R.A., "Properties of friction-stir-welded 7075 T651 aluminum", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 29, No. 7, pp. 1955-1964, (1998).

9. Jata K.V., Sankaran K.K., Ruschau J.J., "Friction-stir welding effects on microstructure and fatigue of aluminum alloy 7050-T7451", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 31, No. 9, pp. 2181-2192, (2000).
10. Rajakumar S., Muralidharan C., Balasubramanian V., "Influence of friction stir welding process and tool parameters on strength properties of AA7075-T6 aluminium alloy joints", *Materials & Design*, Vol. 32, No. 2, pp. 535-549, (2011).
11. Ilangovan M., Rajendra Boopathy S., Balasubramanian V., "Effect of tool pin profile on microstructure and tensile properties of friction stir welded dissimilar AA 6061–AA 5086 aluminium alloy joints", *Defence Technology*, Vol. 11, No. 2, pp. 174-184, (2015).
12. Fuller C.B., Mahoney M.W., Calabrese M., Micona L, "Evolution of microstructure and mechanical properties in naturally aged 7050 and 7075 Al friction stir welds", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 9, pp. 2233-2240, (2010).
13. Goloborodko A., Ito T., Yun X., Motohashi Y., Itoh G., "Friction Stir Welding of a Commercial 7075-T6 Aluminum Alloy: Grain Refinement, Thermal Stability and Tensile Properties", *Materials Transactions A*, Vol. 45, No. 8, pp. 2503-2508, (2004).
14. Su J.Q., Nelson T.W., Sterling C.J., "Microstructure evolution during FSW/FSP of high strength aluminum alloys", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 405, No. 1–2, pp. 277-286, (2005).
15. Holman J.P., "Heat Transfer", McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering, 10th ed.: McGraw-Hill Education, (2009).
16. Gemme F., Verreman Y., Dubourg L., Wanjara P., "Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of AA7075-T6 friction stir welded joints", *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 34, No. 11, pp. 877-886, (2011).
17. Su J.Q., Nelson T.W., Mishra R., Mahoney M., "Microstructural investigation of friction stir welded 7050-T651 aluminium", *Acta Materialia*, Vol. 51, No. 3, pp. 713-729, (2003).
18. Su J.Q., Nelson T.W., Sterling C.J., "Friction stir processing of large-area bulk UFG aluminum alloys", *Scripta Materialia*, Vol. 52, No. 2, pp. 135-140, (2005).
19. Haghdadi N., Zarei-Hanzaki A., Abou-Ras D., "Microstructure and mechanical properties of commercially pure aluminum processed by accumulative back extrusion", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 584, pp. 73-81, (2013).
20. HuT., Ma K., Topping T.D., Schoenung J.M., Lavernia E.J., "Precipitation phenomena in an ultrafine-grained Al alloy", *Acta Materialia*, Vol. 61, No. 6, pp. 2163-2178, (2013).

21. Rhodes C.G., Mahoney M.W., Bingel W.H., Spurling R.A., Bampton C.C., "Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum", *Scripta Materialia*, Vol. 36, No. 1, pp. 69-75, (1997).
22. Kumar P.V., Reddy G.M., Rao K.S., "Microstructure, mechanical and corrosion behavior of high strength AA7075 aluminium alloy friction stir welds – Effect of post weld heat treatment", *Defence Technology*, Vol. 11, No. 4, pp. 362-369, (2015).